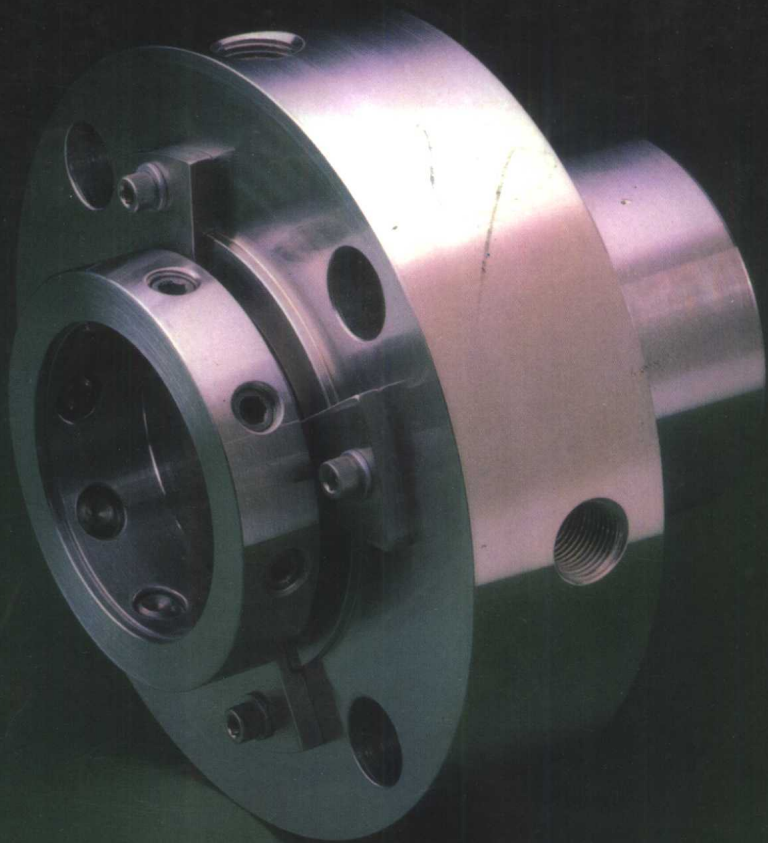
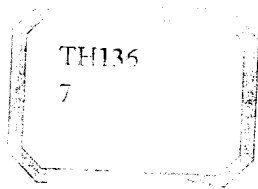


# 机械密封实用技术

顾永泉 著



机械工业出版社  
China Machine Press



# 机械密封实用技术

顾永泉 著



机械工业出版社

本书是介绍国内外较新和非常实用的机械密封技术的专著。书中介绍了液体端面密封基本结构原理和设计使用，气体端面密封基本结构原理和设计使用，流体静压、动压密封技术，接触式和非接触式机械密封，密封件及密封系统；同时还介绍了近年来出现的新技术、新产品、新材料和新标准以及机械密封的故障分析，机械密封标准和选用方法。本书有助于相关技术人员和施工操作人员掌握机械密封实用技术。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械密封实用技术/顾永泉著. —北京:机械工业出版社,  
2001.7

ISBN 7-111-08950-2

I. 机… II. 顾… III. 机械密封-技术 IV. TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 26658 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘涛 沈红 版式设计:冉晓华 责任校对:韩晶

封面设计:方芬 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·14.25 印张·2 插页·425 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

# 前 言

机械密封（又称端面密封）是流体机械和动力机械中不可缺少的零部件。它对整台机器设备、整套装置、甚至对整个工厂的安全生产影响都很大，特别是在石油化工企业中，对保证设备运转可靠、装置连续生产具有重大的意义。在石油化工企业中，所处理的流（气、液）体大多数具有腐蚀性、可燃性、易爆性及毒性，一旦密封失效、介质泄漏，不仅污染环境、影响人体健康和产品质量，而且还会导致火灾、爆炸和人身伤亡等重大事故。因此，不仅要注意和避免肉眼可视的液体泄漏，还应避免不可视气体逸出。

近几十年来，机械密封技术有了很大的发展。由于机械端面密封有着工作可靠、泄漏量少、使用寿命长、适用范围广等优点，故在工业中获得了广泛的应用。尤其是在石油化工机泵中应用最广，在炼油工艺装置中85%以上机泵使用了机械密封。此外，机械密封在许多高压、高温、高速、易燃、易爆和腐蚀性介质等工况下也取得了较好的使用效果。因此，为了使机器设备能在高效率下安全可靠地长时间、连续运转，必须重视发展密封技术和培养掌握密封技术的工程技术人员，专门从事这方面工作，解决生产上出现的有关密封问题。

本书的特点是介绍国内外最新的、最实用的机械密封技术。它不仅介绍液体端面密封基本结构原理和设计使用，还介绍气体端面密封基本结构原理和设计使用；不仅介绍流体静压密封技术，还介绍流体动压密封技术；不仅介绍接触式机械密封技术，还介绍非接触式机械密封技术和两者的联系；不仅介绍密封件本身，还介绍密封系统。特别是新技术、新产品、新材料和新标准等。以及常用故障分析和标准与选用。为了有助于掌握机械密封实用技术和主要问题，对实用的简单计算方法，书中给出了有关数据和图表以及计算实例。每章附有可进一步查用的参考文献。

#### IV

由于篇幅有限，不可能全面阐述，亦难免存在不少缺点或不当之处，敬请广大读者批评指正。

顾永泉  
于北京



## 作者简介

顾永泉 1927年11月生，江苏海门人，1950年毕业于杭州之江大学机械工程系。曾任石油大学(华东)教授、炼油化工机械及流体动密封研究室主任。早在1960年首先在国内研究和在炼油厂推广机械密封，是我国第一位密封专业的研究生导师(至今已指导研究生20余名)，长期从事混合摩擦机械密封和混相润滑机械密封，在这方面有精深研究。80年代开始圆弧槽气体端面密封、液体端面密封和各种表面改形的流体动静压机械密封技术的研究。曾负责石油部七种压缩机新产品的设计和试制，负责石化总公司重点密封科研攻关项目，获国家级、石化总公司与山东省级科技进步奖多项，并取得国家密封实用专利七项。任中国机械工程学会高级会员、流体工程分会常务理事与密封专业委员会主任，美国摩擦学家与润滑工程师学会(STLE)会员及密封技术委员会(STC)成员、国际流体密封会议(ICFS)技术顾问委员会委员等。公开出版了流体动密封、机械端面密封等四部专著和国内外发表论文共贰百余篇，其中机械端面密封获国家教委高教学术著作优秀奖。现为享受国务院政府特殊津贴科技专家、被评为石油天然气总公司石油工业突出贡献专家、山东省专业技术拔尖人才、山东省科教兴鲁先进工作者(省劳模)等称号。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 机械（端面）密封的作用、意义和地位 .....	1
1.2 机械密封的发展简史和目前水平 .....	2
1.3 机械密封技术的发展方向和趋势 .....	3
参考文献 .....	5
<b>第 2 章 机械密封的基本原理</b> .....	6
2.1 机械密封的基本结构、作用原理和特点 .....	6
2.1.1 机械密封的基本结构、作用原理和要求 .....	6
2.1.2 机械密封的基本型式 .....	8
2.1.3 机械密封的特点 .....	12
2.2 机械密封的摩擦和润滑 .....	13
2.2.1 密封副摩擦面特征 .....	13
2.2.2 机械密封的摩擦状态和润滑方式 .....	17
2.2.3 机械密封的相变和空化理论（两相流润滑学说） .....	44
2.2.4 机械密封的磨损理论 .....	59
2.3 机械密封的主要参数 .....	74
2.3.1 几何参数 .....	77
2.3.2 力学参数 .....	82
2.3.3 性能参数 .....	86
2.3.4 机械密封副主要参数的计算及示例 .....	93
参考文献 .....	96
<b>第 3 章 机械密封副的温度和密封环的变形</b> .....	99
3.1 机械密封副的温度 .....	99
3.1.1 机械密封副的热量平衡 .....	99

3.1.2	温度对机械密封的影响	105
3.1.3	端面温度 $t_f$ 及简化计算	109
3.2	机械密封的变形问题	121
3.2.1	密封环的力变形和热变形	122
3.2.2	密封环变形对密封性能的影响	123
3.2.3	密封环的压力变形和热变形的影响因素和改进措施	127
3.2.4	机械密封环变形的计算	132
	参考文献	148

## 第4章 机械密封的总体结构、主要零件和常用材料

4.1	机械密封的总体结构	150
4.1.1	泵用机械密封	150
4.1.2	压缩机用机械密封	165
4.1.3	工艺设备用机械密封	168
4.2	机械密封的主要零件	170
4.2.1	摩擦副(密封副)	170
4.2.2	辅助密封	175
4.2.3	弹性元件	181
4.2.4	其它金属构件	182
4.3	机械密封常用材料及选择	183
4.3.1	密封副材料及选择	183
4.3.2	辅助密封材料及选择	200
4.3.3	弹簧和波纹管材料及选择	203
4.3.4	金属构件材料及选择	204
	参考文献	213

## 第5章 机械密封的设计计算

5.1	设计方法	214
5.1.1	以 $[p_c]$ 或 $[pV]$ 值为基础的经验计算法	214
5.1.2	以 $p$ - $V$ - $T$ - $h$ 系统为基础的计算法	215
5.2	机械密封的模型	228
5.2.1	典型端面机械密封模型	228
5.2.2	表面改形端面机械密封模型	248



5.3 机械密封设计中应考虑的问题 .....	267
5.3.1 对密封要求、设计条件、设计顺序和轴封的介质 性质及工作条件的考虑 .....	267
5.3.2 机械密封设计时结构型式的选择 .....	269
参考文献 .....	275

## 第6章 机械密封的新技术、新概念、 新结构和新产品 .....

6.1 密封面开浅槽密封技术 .....	277
6.1.1 零泄漏密封新技术和新产品 .....	277
6.1.2 干运转气体密封 .....	277
6.1.3 上游泵送密封 .....	281
6.2 密封面开深槽密封技术 .....	282
6.3 控制平衡比密封技术 .....	285
6.3.1 恒平衡比密封 .....	285
6.3.2 变平衡比密封 .....	286
6.3.3 零平衡比密封 .....	286
6.4 多端面密封技术 .....	286
6.4.1 双密封 .....	286
6.4.2 中间环密封 .....	287
6.4.3 三密封和多密封 .....	287
6.5 平行面密封技术 .....	287
6.5.1 两环密封面平行且垂直于轴线和两环密封面平行 但不一定垂直于轴线的变形协调密封 .....	287
6.5.2 应力释放机械密封 .....	287
6.5.3 两环密封面始终贴合来保持两环 密封苗平行-运动密封 .....	289
6.6 正确装配密封技术 .....	290
6.6.1 集装式密封 .....	290
6.6.2 剖分式密封 .....	292
6.6.3 自动对中密封 .....	293
6.7 弹性伸缩密封的波纹管密封技术 .....	293
6.7.1 非对称成形金属波纹管机械密封 .....	293
6.7.2 双层成形金属波纹管机械密封 .....	293

6.7.3 弓形波纹片焊接金属波纹管机械密封 .....	294
6.8 窄密封技术 .....	294
6.8.1 刃边密封 .....	294
6.8.2 窄面密封 .....	294
6.9 标准密封技术 .....	295
6.9.1 对称密封 .....	295
6.9.2 标准密封 .....	297
6.10 安全密封技术 .....	297
6.10.1 备用密封 .....	297
6.10.2 串级密封 .....	298
6.10.3 抑制密封 .....	298
6.11 流体阻塞密封技术 .....	298
6.12 零逸出密封技术 .....	300
6.13 监控密封技术 .....	302
6.13.1 压电监控膜压 .....	302
6.13.2 应变仪监控 $f-G$ 特性 .....	302
6.13.3 声发射监控密封面状况和振动 .....	302
6.13.4 测压力和温度监控密封间隙内流体膜相态 .....	303
6.14 组合密封技术 .....	304
6.14.1 机械密封-浮环组合密封 .....	304
6.14.2 机械密封-螺旋组合密封 .....	305
6.14.3 机械密封-迷宫螺旋组合密封 .....	306
参考文献 .....	308
<b>第7章 机械密封系统、标准和选择 .....</b>	<b>311</b>
7.1 机械密封系统 .....	311
7.1.1 机械密封系统的布置和零逸出密封技术 .....	311
7.1.2 机械密封系统的压力控制系统 .....	313
7.1.3 机械密封系统的温度控制系统 .....	315
7.1.4 流体替代(环境替代) .....	329
7.1.5 流体密封系统的杂质清除系统 .....	332
7.2 机械密封有关国内外标准 .....	336
7.2.1 密封箱标准 .....	336
7.2.2 易挥发物逸出量控制指南 STLE SP-30 .....	337

7.2.3	离心泵与转子泵的轴封系统标准 API 682 .....	338
7.2.4	石油、重型化工及气体工业用离心泵标准 API 610 中机械密封布置和配管方案 .....	340
7.2.5	国内机械密封标准 .....	343
7.3	机械密封装置和机械密封系统的选择 .....	348
7.3.1	按照 API 682 的程序框图选用 .....	348
7.3.2	密封型式的选择 .....	348
7.3.3	API 682 标准密封材料 .....	350
7.3.4	密封装置的选择 .....	351
	参考文献 .....	355
<b>第 8 章</b>	<b>机械密封的故障分析 .....</b>	<b>356</b>
8.1	机械密封的故障、故障分析及其定义 .....	356
8.2	机械密封的故障分析方法 .....	357
8.2.1	一般故障诊断的方法——目测检查和故障判断 .....	357
8.2.2	威布尔指数可靠性分析结合的故障分析方法 .....	361
8.2.3	相态分析结合的故障分析方法 .....	369
8.2.4	故障树分析方法 .....	384
8.2.5	磨损图像分析方法 .....	389
8.2.6	平晶平直度检查和判断 .....	395
8.3	机械密封故障模式、机理、原因和纠正措施 .....	401
8.3.1	典型的故障模式、机理和原因的分析 .....	401
8.3.2	常见故障模式、机理、原因和纠正措施 .....	421
8.3.3	故障诊断检查和记录 .....	421
	参考文献 .....	443

# 第 1 章 概 述

## 1.1 机械（端面）密封的作用、意义和地位

### 1. 作用

(1) 提高机器效率、降低能耗。

1) 减少机器的内漏、外漏和穿漏，提高机器容积效率。例如，大庆炼油厂将焦化 5FDJ5×2 离心泵的叶轮口环改为机械密封，使泵效率提高 3.6%~5.6%。

2) 减少摩擦损失，提高机器的机械效率。例如，将双端面密封改为单端面密封、非平衡型改为平衡型、双支承减底泵封闭一端（所谓砍头泵）减少密封都能减少摩擦损失，提高机械效率。

3) 改变密封方式，提高机器或机组的效率。例如，将屏蔽泵改用机械密封泵，使电动机效率提高；采用磁力传动泵，提高机器效率。

4) 改变辅助系统，减少能耗，提高机组效率。例如，热油泵自冲洗改为小叶轮循环冲洗；双端面密封改为单端面密封，节省封油辅助系统的能耗。

(2) 节约原材料。例如，工艺流体回收，减少或消除动力蒸汽和工艺流体的损耗，减少封油损耗等。

(3) 提高机器可靠性。例如，轴封的漏损和寿命决定轴封和机器的可靠性。

(4) 安全和环境保护。根据日本某厂调查报告，在发生的 786 件事故中有 332 件是泄漏造成的（占 42%）。此外工艺流体泄漏还会造成环境污染，包括对大气污染、水污染和车间环境污染。

### 2. 意义

(1) 密封技术虽然不是领先性技术，但却是决定性技术 例如，美国挑战号航天飞机由于密封事故而坠落；核电站循环泵为了安全可

靠，由有轴封泵改成无轴封泵。改进机械密封后因工作可靠，又由无轴封泵改回成有轴封泵，从而提高了电动机效率。这两件事情充分说明机械密封虽然不是领先性技术，但却是决定性技术。

(2) 密封件虽然不大，只是个零部件，但却能决定机器设备的安全性、可靠性和耐久性 在石油化工厂机泵釜中的轴封不大，一旦发生产品泄漏事故，不仅会影响到机泵设备的工作，还会发生燃烧或爆炸，造成工艺装置停工和人身伤亡等。

(3) 机械密封在日常机泵釜等设备维修工作中，工作量约占 50% 通过对国内外几个石化企业的调查<sup>[1-2]</sup>，都说明了在日常机泵釜等设备维修中，机械密封的维修工作量几乎占 50%。国外爱克西翁公司的威尔在其文中提到，离心泵的维修费大约有 70% 是由于密封故障。<sup>[1-3]</sup>

### 3. 地位

据调查，石化工艺装置机泵中有 86% 以上采用机械密封<sup>[1-4]</sup>。随着机械密封技术的发展，在机泵中机械密封将占有更加重要的地位。

## 1.2 机械密封的发展简史和目前水平

### 1. 发展简史

机械密封的发展简史，可以用表 1-1 来说明。

表 1-1 机械（端面）密封的发展简史

年代	几点历史事实	$p_v V$ 值水平 / (MPa·m/s)	发展的动力
1885	英国第一个端面密封的专利		液压传动、蒸汽机和机床产生作为油封
1900	开始用于轴承密封		
1908	汽轮机上出现几个端面密封		
1919	出现单端面密封		结构上单、双端面密封形成机械密封
1920	用于小型家用冷冻压缩机和汽车水泵	<1.0	
1930	用于内燃机水泵	3.04	机械加工和材料方面的技术进步
1940	在一定程度上解决轻烃泵密封		

(续)

年代	几点历史事实	$p_s V$ 值水平 / (MPa·m/s)	发展的动力
1945	出现平衡型和中间环高压高速机械密封	14.7	石油化工发展; 石墨、陶瓷、硬质合金等新材料; 密封面粗糙度的改进, 由 $R_a 0.2 \mu\text{m}$ 改为 $R_a 0.1 \mu\text{m}$
1957	美国西乐 Sealol 公司第一个金属波纹管机械密封高温密封	30	航空、石油化工等工业要求 (400℃)
1960	出现热流体动力楔机械密封流体		原子能工业要求; 结构上出现流体静压、流体动压和热流体动压密封 (动力楔和动压垫效应)
1963 ~1969	静压密封、流体动压密封及工业上应用	167~267	
1974	出现新的密封面材料碳化硅和优质不同浸渍碳石墨	353	宇航和核电特殊要求; 结构上出现多级密封; 材料有碳化硅和优质碳石墨
1977	出现各种密封的组机械密封和螺旋槽干运转气体密封工业应用	500	由于宇航和核电需要, 出现螺旋-机械密封、浮环-机械密封和螺旋槽密封
1985	密封面变形协调和材料合适对工艺流体的零泄漏和零逸出密封技术迅速发展	700	用于高 $p_v$ 值热水泵密封, 环境保护、长寿命和安全生产要求 API610、API682 和 STLE SP-30 等新标准
2000	非接触 (表面改形技术) 机械密封发展	$\geq 1000$	用激光加工、表面改形技术、计算机技术和密封设计理论发展

## 2. 目前水平

机械密封的目前水平:

单级压力  $10^{-3} \text{Pa} \sim 35 \text{MPa}$

使用温度 最高达 1000℃; 最低可达低温深冷

机器转速 高达 50000r/min

$p_s V$  值 达 1000MPa·m/s

## 1.3 机械密封技术的发展方向和趋势<sup>[1-6]</sup>

### 1. 发展方向

(1) 接触式密封 减少泄漏、减小磨损、提高可靠性和工作稳定

性、延长使用寿命。

(2) 非接触式密封 减少泄漏、提高流体膜刚度和工作稳定性、延长使用寿命。

## 2. 发展趋势

随着科技进步和工业的发展，高参数机械密封实用化的要求越来越高。具体可用图 1-1 来表示机械密封技术的发展趋势。

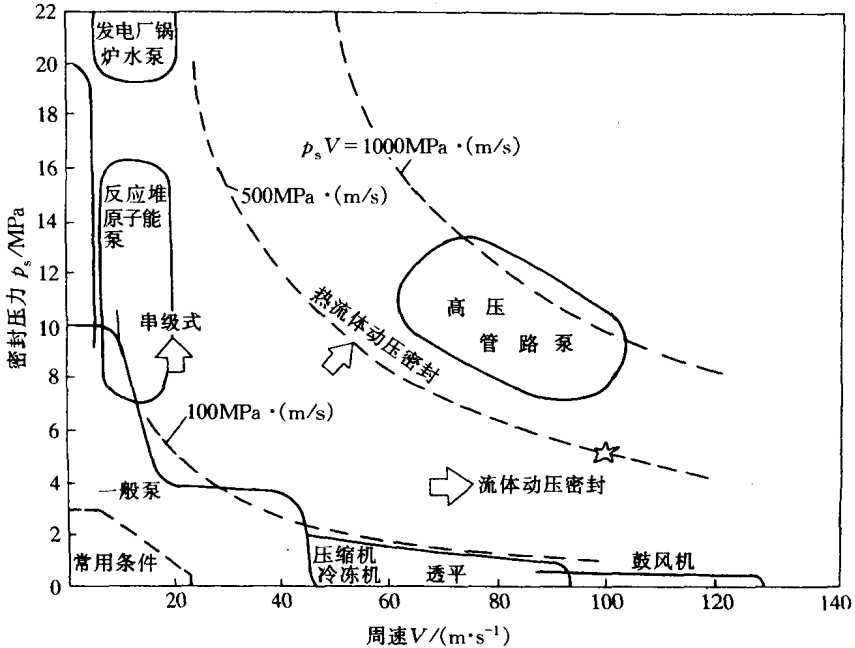


图 1-1 机械密封技术的发展趋势

## 3. 发展特点

(1) 技术不断创新 新技术、新概念、新产品、新材料、新工艺和新标准不断涌现；高参数（如高压、高速、高温、大直径）、高性能（如干运转、零泄漏、无油润滑、浆液）和高水平（如高  $pV$  值、大型剖分式、监控）的密封产品大量研制；失效机理（如疤痕、热裂、空化-汽蚀、橡胶密封圈泡胀和老化）、失效分析（如可靠性和概率）和失效监控（如流体膜、摩擦状态和相态）的研究和应用。

(2) 使用范围不断扩大 机械密封不仅机泵阀采用,而且工艺设备(如反应釜、转盘塔、搅拌机、离心机等)都采用。

(3) 发展要求重视密封系统 过去只重视单独密封件,现在已经发展到重视整个密封系统,而且已制订了新的密封系统标准(API-682“离心泵与转子泵的轴封系统”标准)。

(4) 注意安全和环境保护 过去只注意眼睛可视的“泄漏”,不注意眼睛看不见的易挥发物的“逸出”;现在发展到要求控制易挥发物的逸出量,也就是说从要求“零泄漏”到要求“零逸出”。美国摩擦学家和润滑工程师学会(简称STLE摩润学会)已制订了SP-30等易挥发物逸出量控制规定的指南。

(5) 要求不断提高 在石油化工方面,为了延长工艺装置的检修周期和装置的操作周期,要求机械密封的工作寿命由1年延长到2年,国外由2年延长到3年(API-682中作了明确规定)。

(6) 研制产品要求实用化 不仅要求研制出新产品,更重要的是使所研制产品得到实际应用。

## 参 考 文 献

- 1-1 顾永泉. 流体密封技术在节能方面的作用. 流体工程, 1982, 试刊: 37~40, 65~66
- 1-2 顾永泉. 石油化工用离心泵的故障分析. 水泵技术, 1977, (2): 19~34, 40
- 1-3 Will P A. Effects of Seal Face Width on Mechanical Seal Performance-Hydrocarbon Tests. Lubrication Engineering, 1984, 40 (9): 522~527
- 1-4 赖盛刚, 顾永泉等. 石油化工设备密封技术调查报告, 石油化工设备密封技术文集, 1984, 第二集: 1~42
- 1-5 顾永泉. 发展密封学, 提高密封技术水平. 中国机械工程学会流体工程分会第二届密封年会, 四川成都, 1988
- 1-6 顾永泉. 机械密封新技术-新概念和新产品. 中国机械工程学会流体工程分会第三届密封年会, 福建厦门, 1994



## 第 2 章 机械密封的基本原理

### 2.1 机械密封的基本结构、作用原理和特点

#### 2.1.1 机械密封的基本结构、作用原理和要求<sup>[2-1~3]</sup>

机械密封是一种依靠弹性元件对静、动环端面密封副的预紧和介质压力与弹性元件压力的压紧而达到密封的轴向端面密封装置（图 2-1），故又称端面密封。

构成机械密封的基本元件有：端面密封副（静环 1 和动环 2）、弹性元件（如弹簧 4）、辅助密封（如 O 形圈 8 和 9）、传动件（如传动销 3 和传动螺钉 7）、防转件（如防转销 10）和紧固件（如弹簧座 5、推环 12、压盖 11、紧定螺钉 6 与轴套 13）。

机械密封基本元件的作用和要求如下：

1) 端面密封副（静、动环） 端面密封副的作用是使密封面紧密贴合，防止介质泄漏。它要求静、动环具有良好的耐磨性，动环可以轴向灵活地移动，自动补偿密封面磨损，使之与静环良好地贴合；静环具有浮动性，起缓冲作用。为此密封面要求有良好的加工质量，保证密封副有良好的贴合性能。

2) 弹性元件（弹簧、波纹管、隔膜） 它主要起预紧、补偿和缓冲的作用，要求始终保持足够的弹性来克服辅助密封和传动件的摩擦和动环等的惯性，保证端面密封副良好的贴合和动环的追随性，材料要求耐腐蚀、耐疲劳。

3) 辅助密封（O 形圈、V 形圈、U 形圈、楔形圈和异形圈） 它主要起静环和动环的密封作用，同时也起到浮动和缓冲作用。要求静环的密封元件能保证静环与压盖之间的密封性和静环有一定的浮动性，动环的密封元件能保证动环与轴或轴套之间的密封性和动环的浮动性。材料要求耐热、耐寒并能与介质相容。

4) 传动件（传动销、传动环、传动座、传动键、传动突耳或牙